

地球学报  
*Acta Geoscientica Sinica*  
ISSN 1006-3021, CN 11-3474/P

## 《地球学报》网络首发论文

题目: 宝兴沟金矿地球物理测井响应特征及找矿标志  
作者: 杜海双, 陈洪鹏, 王梦琦, 周传芳, 张天恩, 万珏昶  
收稿日期: 2025-04-28  
网络首发日期: 2025-08-21  
引用格式: 杜海双, 陈洪鹏, 王梦琦, 周传芳, 张天恩, 万珏昶. 宝兴沟金矿地球物理测井响应特征及找矿标志[J/OL]. 地球学报.  
<https://link.cnki.net/urlid/11.3474.p.20250821.1014.002>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 宝兴沟金矿地球物理测井响应特征及找矿标志

杜海双, 陈洪鹏\*, 王梦琦, 周传芳, 张天恩, 万珏永

中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江哈尔滨 150086;  
自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江哈尔滨 150086

**摘要:** 大兴安岭地区作为我国重要的 Au(Cu-Mo)成矿带, 历经长期的矿产开发与勘查实践, 现阶段该区域地质勘探工作的核心科学问题聚焦于通过创新勘查技术方法实现深部及外围隐伏矿体的找矿突破。本文以宝兴沟金矿为例, 选择 ZK0706 验证钻孔, 集成多参数地球物理测井与井中物探技术, 结合 790 m 全孔段岩心数字化编录数据, 采用直方图与多参数交会图技术, 定量解析了 110~790 m 垂向空间内闪长岩、闪长玢岩-蚀变岩带的地球物理场响应规律, 建立了岩性识别阈值, 划分了钻孔岩性剖面 and 矿化蚀变层。研究成果表明: 基于自然伽马、电阻率、磁化率与电极电位四类测井参数组合, 可构建闪长岩-蚀变岩系岩性识别模型, 为隐伏矿体三维定位提供关键地球物理判据。定量解析揭示: 宝兴沟矿区黄铁矿化强度与电阻率异常无显著相关性, 而硅化碎裂带发育程度与电阻率降幅呈现耦合特征。研究建立了“低阻-中高伽马-多峰高值电极电位”异常组合的宝兴沟金矿区地球物理测井找矿标志。该成果不仅能够有效圈定赋金有利层位精确指导金矿深边部找矿工作, 更为实施 2 000 m 以深勘探工程部署提供了依据。

**关键词:** 宝兴沟; 金矿; 测井; 岩性响应特征; 找矿标志

中图分类号: P631 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2025.082011

## Response Characteristics and Prospecting Signs of Geophysical Well Logging in the Baoxinggou Gold Deposit

DU Haishuang, CHEN Hongpeng\*, WANG Mengqi, ZHOU Chuanfang,  
ZHANG Tian'en, WAN Juechang

Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey,  
Harbin, Heilongjiang 150086;  
Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin,  
Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

**Abstract:** As an important Au(Cu-Mo) metallogenic belt in China, the Great Hinggan Mountains region has undergone prolonged mineral development and exploration. The current core scientific challenge in geological prospecting is achieving breakthroughs in locating deep and peripheral concealed ore bodies through innovative exploration technologies. Taking the ZK0706 verification borehole in the Baoxinggou gold deposit as an example, by integrating multi-parameter geophysical logging and in-well geophysical exploration techniques, in combination with digital core recording data of the entire 790 m borehole section, and using histogram and multi-parameter intersection graph techniques, this study quantitatively analyzed the geophysical field response law of the diorite and diorite porphyrite-modified rock zone in the vertical space of 110-790 m and established the lithology identification threshold. The lithological profile of the borehole and the mineralized alteration layer were divided. The results demonstrated that a lithological identification model for diorite-altered rock series can be constructed using a combination of natural gamma, resistivity, magnetic susceptibility, and electrode potential

本文由中国地质调查局项目(编号: DD20242753)资助。

收稿日期: 2025-04-28; 改回日期: 2025-07-12。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 杜海双, 男, 1990 年生。本科, 高级工程师。主要从事勘探地球物理工作。E-mail: duhaishuang@mail.cgs.gov.cn。

\*通信作者: 陈洪鹏, 男, 1986 年生。本科, 高级工程师。主要从事地质找矿工作。E-mail: chphq1986@qq.com

parameters, providing critical geophysical criteria for three-dimensional targeting of concealed ore bodies. Quantitative analysis revealed that pyritization intensity in the Baoxinggou deposit exhibits no significant correlation with resistivity anomalies, whereas the development of silicified fracture zones shows a coupling relationship with resistivity reduction. A ternary anomaly combination of "low-resistivity, moderate-to-high gamma, and multi-peak high electrode potential" was established as a geophysical logging indicator for gold exploration in the Baoxinggou gold deposit. This achievement not only effectively delineates favorable horizons for hosting gold to guide deep and peripheral prospecting but also provides a scientific basis for deploying three-dimensional exploration projects beyond 2000 m depth.

**Key words:** Baoxinggou; gold deposit; well logging; lithological response characteristics; prospecting signs

大兴安岭北部是我国重要有色金属、贵金属成矿带,素有“金镶边”的美称(黑龙江省地质矿产局, 1988; 武广等, 2024)。目前已发现金属矿床 79 处,其中大型规模以上 22 处(武广等, 2024)。该区域地质构造复杂,成矿条件优越,已发现砂宝斯、甲乌拉等大型金矿床,累计探明金资源量超百吨,彰显其巨大的资源潜力(李向文, 2015; WANG et al., 2021; 武广等, 2024)。然而,受限于森林-沼泽景观覆盖和地质研究程度不足,尤其是北段地区长期存在地质空白,成矿规律尚不清晰,矿床成因与找矿标志的量化研究亟待深化(赵丕忠等, 2014; 陈新凯等, 2023)。

黑龙江省塔河县宝兴沟金矿床是近年新发现的一处大型金矿床,已探明储量 24.3 t。前人围绕宝兴沟金矿床地质特征、成矿流体、成矿时代、控矿构造等方面开展了大量的研究工作,取得了一系列重要的地质找矿研究成果(程晓飞等, 2011; 李向文等, 2012; 周传芳等, 2012; 王献忠等, 2014; 陈卓等, 2018; 李向文等, 2018; 周传芳等, 2018)。但其深部矿体定位研究仍面临挑战,特别是巨厚覆盖层与复杂构造格架致使传统地表勘查方法的探测精度显著降低,亟须高精度地球物理探测技术的深部应用(周平等, 2009; Lu et al., 2015)。地球物理勘探技术依据矿体-围岩系统的磁化率、密度、电阻率、极化率及波阻抗等物性参数差异,通过识别与矿化过程密切关联的容矿构造、蚀变岩带及标志性地质异常体来实现深部矿体定位,凭借其显著的深部探测优势、经济高效特性及环境兼容性特征,现已成为金矿资源勘查体系中不可或缺的技术支撑。国内外专家学者针对不同类型金矿地球物理场特征和地面地球物理勘探方法组合以及应用效果做了很多研究工作(Irvine et al., 1990; 王志辉等, 2016; 吕庆田等, 2019; 武军杰等, 2020; 底青云等, 2021),但地球物理测井及井中物探方法在金矿找矿方面的研究及应用程度却略显不足。

地球物理测井及井中物探技术作为原位探测岩矿石物性参数的有效手段,通过解析岩性界

面、地质构造及地层序列信息,可表征与金矿化相关的蚀变特征、界定蚀变类型及其空间展布,进而甄别成矿有利层位并最终圈定矿化空间展布规律(Urbanci 等, 1989; 周远田, 1990; 王新娥等, 2014; 熊玉新等, 2018; 沈立军等, 2021; 汪青松等, 2021; 刘东明等, 2024),有着其他物探方法不可比拟的优势。ZK0706 孔为宝兴沟金矿区实施的矿体深部追踪验证孔,施工过程中完成全孔连续取心,终孔后同步开展多参数地球物理测井及井中物探。本文基于 110~790 m 井段测井数据,通过数据精细处理与多源信息融合,系统开展岩性划分、矿化蚀变带判别及金矿有利层位预测研究,构建了钻孔岩性-物性综合剖面,厘定了主矿化蚀变层位空间分布,建立了测井找金标志体系,研究成果不仅为宝兴沟矿区深部及外围勘查提供理论支撑,也为区域金矿勘探方法优化提供技术范式。

## 1 地质概况

### 1.1 地质背景

宝兴沟金矿区位于大兴安岭火山岩带东北缘构造交汇区,隶属上黑龙江盆地南缘与腰站拗陷—二十二站隆起过渡带(图 1a, b)。该区处于古亚洲洋构造域与环太平洋构造域复合部位,中生代时期已转入滨太平洋构造域演化阶段,受控于太平洋板块 NNW 向俯冲作用,形成了兴蒙造山带基本的壳幔结构格架(张顺等, 2003; 赵广江等, 2006; 慕倩等, 2023)。该区域地层主要由古元古界兴华渡口群及中生代岩系构成。兴华渡口群以变质岩系为特征,主要包含片岩、变粒岩、片麻岩和大理岩等变质岩类。中生代地层可划分为火山岩系与沉积岩系两大序列:火山岩系以基性-中性喷出岩为主,形成了玄武岩、安山玄武岩等火山岩组合;沉积岩系则由多组碎屑岩层构成,包括光华组、二十二站组、漠河组等砂岩与砾岩沉积序列,以及绣峰组、白音高老组和九峰山组等碎屑岩地层(刘建明等, 2004; 武广, 2006; 周传芳等, 2018)。



## 1.2 矿床地质特征

宝兴沟金矿床位于塔河县东北方向小根河林场, 矿床类型为中浅成、中温热液型(王献忠等, 2014), 构造上处于二十二站隆起与腰站凹陷接触边界(图 1b)。矿区地层出露简单, 主要包括侏罗系中统两套地层系统和第四系松散堆积物(图 1c)。其中二十二站组( $J_{2er}$ )在勘查区域内大面积展布, 其岩相组合表现为黑灰色中粒砂岩与泥质粉砂岩互层, 伴生钙质泥岩及长石杂砂岩, 地层基底发育典型砾岩-粗砂岩建造。漠河组( $J_{2m}$ )与二十二站组呈连续沉积主要出露于矿区西北向, 岩性特征以黑灰色粗砂岩为主, 夹砾岩和中细砂岩, 夹层中含长石岩屑砂岩、泥质粉砂岩(周传芳等, 2012; 王献忠等, 2014)。

区内断裂构造以北东向的依西肯—二十站断裂、绥安站—十五里桥断裂为主干构造, 并发育北东、北西向次级断裂。其中北东向次级断裂对矿体展布具有显著控制作用(李向文等, 2012; 陈卓等, 2018)。岩浆活动以浅成侵入岩为主, 侵入到二十二站组和漠河组地层。主要包括石英闪长岩、闪长玢岩及花岗细晶岩等, 是本区主要的控矿岩体(宋丙剑等, 2015; 周传芳等, 2018)。石英闪长岩呈不规则岩株状或脉状产于矿区中西部, 地表展布规模约 500 m×800 m; 闪长玢岩与闪长岩脉共生, 集中分布于 I 号矿化蚀变带中部, 地表出露范围约

300 m×1 500 m; 花岗细晶岩脉则赋存于 II 号矿化蚀变带内, 地表延伸规模约 150 m×1 200 m。

矿床外围北侧及南西部分布有燕山期花岗斑岩、花岗闪长斑岩及花岗细晶岩等岩株状岩体。另外, 矿区花岗细晶岩脉西侧可能存在隐伏石英闪长岩体。

## 1.3 含矿构造及矿体特征

宝兴沟金矿床共发现 5 条金矿带 89 条金矿(化)体, 主要赋存于侵入岩与砂岩的接触部位。其中以 I 号金矿带最大, 发现 61 条金矿(化)体, II 号次之, 发现 21 条金矿(化)体。I 号金矿带位于矿区西北部, 可进一步分为 I-1 和 I-2 两个矿带, 地表出露长度 1 120 m, 宽 760 m, 走向 25°, 为一条破碎蚀变带, 其内圈定 46 条矿体, 矿体以脉状构造形式主要赋存于闪长玢岩-石英闪长岩与二十二站组砂岩接触界面, 以及石英闪长岩侵入体内部。容矿岩系主要包括蚀变砂岩、闪长岩类蚀变岩(含闪长玢岩)、构造破碎带蚀变岩体及石英质脉体(李向文等, 2012; 王献忠等, 2014)。II 号金矿带位于矿区东北部, 进一步分为 5 个矿带, 控制长度 780 m, 宽 730 m, 为一条破碎蚀变带, 其内圈定 14 条矿体, 矿体以脉状地质体形式就位于二十二站组砂岩层系中, 其空间展布受花岗细晶岩脉西侧构造带控制(李向文等, 2012; 王献忠等, 2014)。I、II 号矿化蚀变带内矿体呈北东

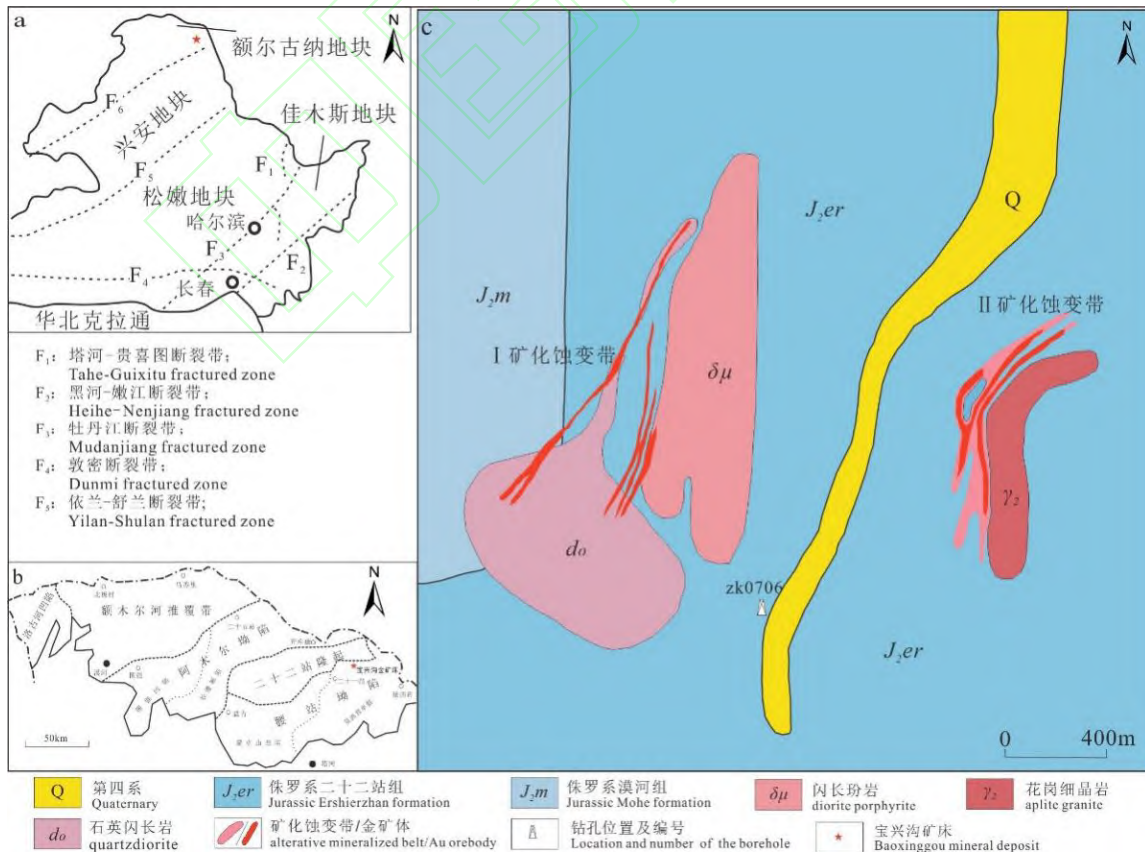


图 1 宝兴沟金矿床大地构造位置(a、b)及矿区地质简图(c)(据李向文等, 2012 修改)

Fig. 1 Schematic tectonic map (a, b) and sketch geological map (c) of the Baixinggou gold deposit

向延伸分布,形态具分叉复合、膨缩变化及尖灭再  
现特征。围岩蚀变以硅化、碳酸盐化、绿泥石化和  
绢云母化为主,金属矿物以黄铁矿为主,伴生黄铜  
矿、方铅矿及闪锌矿;脉石矿物以石英、长石占优,  
次要成分为绿泥石与绢云母,局部发育不规则网状  
石英-方解石细脉,脉宽介于 0.5~10 mm 之间;矿石  
构造以浸染状、细脉浸染状为主,局部发育团块状  
构造(李向文等,2012)。

1.4 钻孔及测井情况

ZK0706 孔位于宝兴沟金矿区的南部,控制I-1  
和I-2 两条金矿带,构造上位于依西肯单斜的北翼  
(图 1b),终孔深度 800 m,倾角 82°,方位角 312°,  
开孔直径 108 mm,终孔直径 75 mm。钻遇地层岩性  
主要包括中砂岩、闪长岩、闪长玢岩、粗砂岩、蚀  
变砂岩、蚀变闪长岩、蚀变闪长玢岩等(图 2),岩心  
矿化蚀变主要有黄铁矿化、绿泥石化、碳酸盐化、  
硅化、少量方铅矿化和黄铜矿化。

ZK0706 孔在终孔后进行了多参数的地球物理  
测井和井中物探测量工作,测量时 0~6.75 m 为金属  
套管段,6.75~800 m 为裸眼井段。仪器设备采用

重庆地质仪器厂的 JCX-1 型智能测井系统,测量参  
数为自然伽马、电阻率、磁化率、电极电位、磁三  
分量等,测量井段为 6.75~790 m。原始测井资料质  
量良好,满足金属矿地球物理测井规范(DZ/T  
0297-2017)要求,可用于钻孔剖面的地质解释。

2 结果与分析

2.1 岩性的测井响应与识别

分析了解地层岩性的测井响应特征是开展金  
矿测井工作评价的基础。ZK0706 孔岩性相对简单,  
钻遇主要岩性中的中砂岩、闪长岩、闪长玢岩占  
钻遇岩性总厚度 95%以上,其他岩性厚度均不超  
过 30 m,不具有典型性,因此只对主要岩性的测  
井响应特征进行分析。通过分析岩心编录资料中  
巨厚层岩性段的测井响应,优选出磁化率、自然  
伽马、电阻率、电极电位 4 种对岩性和金属矿化  
敏感的参数。选取地层完整,厚度大于 5 m,编录  
无明显矿化异常显示的井段,利用统计直方图,  
呈现各主要岩性的物性分布特征(图 3),响应特征  
值见表 1。

根据主要岩性的物性统计结果(图 3)发现,闪  
长岩、闪长玢岩和中砂岩的电阻率、自然伽马、磁  
化率及电极电位频率分布直方图均呈现出一定的离  
散性。其中磁化率和电极电位呈现不同程度的高值  
异常,而电阻率则出现低值异常,表明数据统计中  
仍包含矿化蚀变异常井段的信息。因此,仅依靠岩  
心观察难以全面准确地识别所有矿化异常带。

中砂岩电阻率在三类岩性中最高,分布范围较  
集中,与闪长岩、闪长玢岩形成显著差异。磁化率、  
电极电位和自然伽马参数分布离散性较强,其频率  
分布直方图呈现明显不对称性,且表现出显著的数据  
分异特征。磁化率和电极电位直方图峰值右侧可  
见少量极高值异常区,自然伽马直方图峰值右侧则

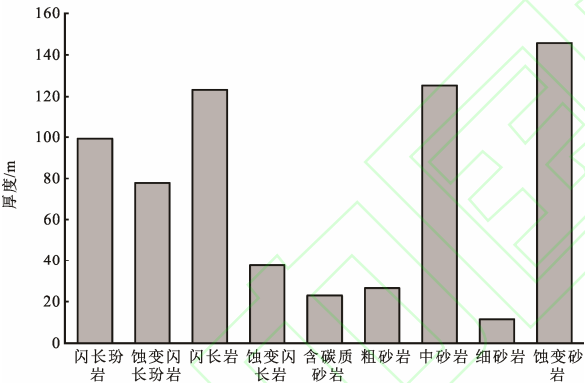


图 2 ZK0706 孔主要岩性厚度统计直方图  
Fig. 2 Statistical histogram of the thickness of the main  
lithologies in hole ZK0706

表 1 ZK0706 孔主要岩性物性统计表  
Table 1 Statistics of physical properties of main lithologies in hole ZK0706

岩性	磁化率/(10 <sup>-6</sup> SI)		自然伽马/API		电阻率/(Ω·m)		电极电位/mV	
	最小值/ 最大值	平均值/ 中位数	最小值/ 最大值	平均值/ 中位数	最小值/ 最大值	平均值/ 中位数	最小值/ 最大值	平均值/ 中位数
闪长岩	669.87/ 907.22	799.76/ 802.13	15.31/ 65.14	34.39/ 33.51	358.23/ 2792.48	1231.68/ 1053.44	-85.00/ -67.00	-74.87/ -75.00
闪长玢岩	730.85/ 945.10	773.33/ 768.69	24.82/ 75.57	45.14/ 43.12	126.1/ 1732.12	538.98/ 451.87	-73.00/ -63.00	-68.02/ -68.00
中砂岩	604.56/ 726.70	706.70/ 955.71	31.28/ 48.27	50.12/ 92.45	532.42/ 3895.19	1804.90/ 1805.14	-84.00/ -70.00	-70.80/ -64.00
蚀变砂岩	591.98/ 1037.49	673.48/ 697.3	34.53/ 125.66	68.67/ 65.81	14.94/ 3395.72	843.89/ 719.79	-83.00/ 8.00	-70.40/ -72.00
蚀变闪长岩	650.99/ 871.48	769.73/ 777.08	21.68/ 51.83	34.61/ 34.2	51.92/ 1842.75	712.39/ 694.71	-86.00/ -51.00	-76.13/ -76.00
蚀变闪长玢岩	625.82/ 764.50	704.99/ 716.21	35.2/ 149.99	59.18/ 57.3	55.6/ 4376.92	1159.13/ 1014.18	-84.00/ -20.00	-70.26/ -69.00

展布宽缓的高异常区,表明中砂岩普遍发育矿化蚀变现象,可能是浸染状矿化作用所致(陈卓等, 2018; 刘金伟, 2020)。因此中砂岩表现为低磁化率、高自然伽马、高电阻率的响应特征(图 3a)。

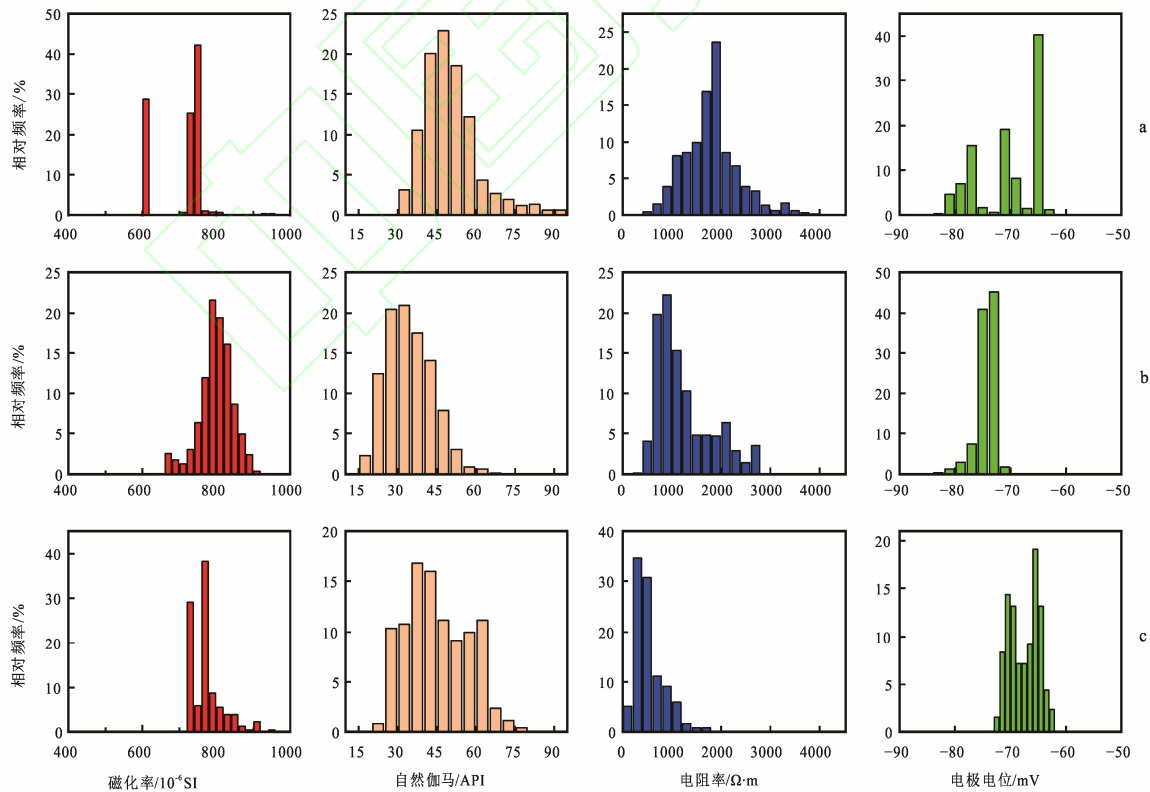
闪长岩的磁化率、自然伽马、电阻率及电极电位参数分布相对集中,仅少量电阻率数据呈离散分布,可能反映薄层砂岩夹层影响。其磁化率为三类岩性最高值,自然伽马属最低值,电极电位为三类岩性最低值,电阻率介于中砂岩与闪长玢岩之间。综合显示闪长岩具有高磁化率、低自然伽马、中高电阻率及低电极电位的特征组合(图 3b)。

闪长玢岩四种物性参数整体分布特征与闪长岩相似,但磁化率和电阻率总体偏低,自然伽马与电极电位则相对偏高。其中磁化率和电极电位存在少量高值异常分布,可能与金属矿化异常段混入数据统计有关。其响应特征表现为中高磁化率、中自然伽马、低电阻率及高电极电位的组合特征(图 3c)。

基于各井段数据统计分析,通过计算测井响应均值构建钻孔主要岩性测井参数交会图(图 4)。交会图显示三类岩性分布特征: 第一类(红球)分布于高磁化率、低自然伽马; 中等偏高电阻率、低电极电位区域,表征闪长岩; 第二类(绿球)集中在中高磁化率、高自然伽马; 低电阻率、高电极电位区域,对

应闪长玢岩; 第三类(蓝球)主要位于低磁化率、高自然伽马与高电阻率区域,其电极电位分布规律性较弱,指示中砂岩。值得注意的是,图 4c、d 中红球与绿球分布区域存在重叠,表明电极电位参数对闪长岩与闪长玢岩的区分度有限,但对中砂岩具有显著识别效果。综合自然伽马、电阻率、磁化率及电极电位四参数组合,可实现闪长岩、闪长玢岩与中砂岩的有效鉴别。

基于岩性物性统计与交会图解译成果,综合磁化率、自然伽马、电阻率核心参数,辅以电极电位及岩心编录资料,构建了 ZK0706 钻孔测井岩性解释剖面(图 5): 110~350 m 井段为二十二站组中砂岩与闪长岩、闪长玢岩接触带,呈现三种岩性互层并发育破碎带; 350~415 m 井段以闪长玢岩为主; 415~545 m 井段为闪长玢岩-闪长岩接触带,两岩性交替分布并含破碎带,随深度增加闪长玢岩单层厚度显著增大; 545~685 m 井段属侵入岩(闪长岩、闪长玢岩)与二十二站组砂岩过渡带,三种岩性互层发育,侵入岩层厚较薄且顶部砂岩碳质含量偏高、粒度分选不均; 685 m 至终孔段为厚层砂岩,底部砂岩粒度明显粗化。该剖面系统揭示了钻孔地层结构、岩性界面及构造破碎带空间展布,为矿化带定位提供了关键地质依据。



a—中砂岩物性统计直方图; b—闪长岩物性统计直方图; c—闪长玢岩物性统计直方图。

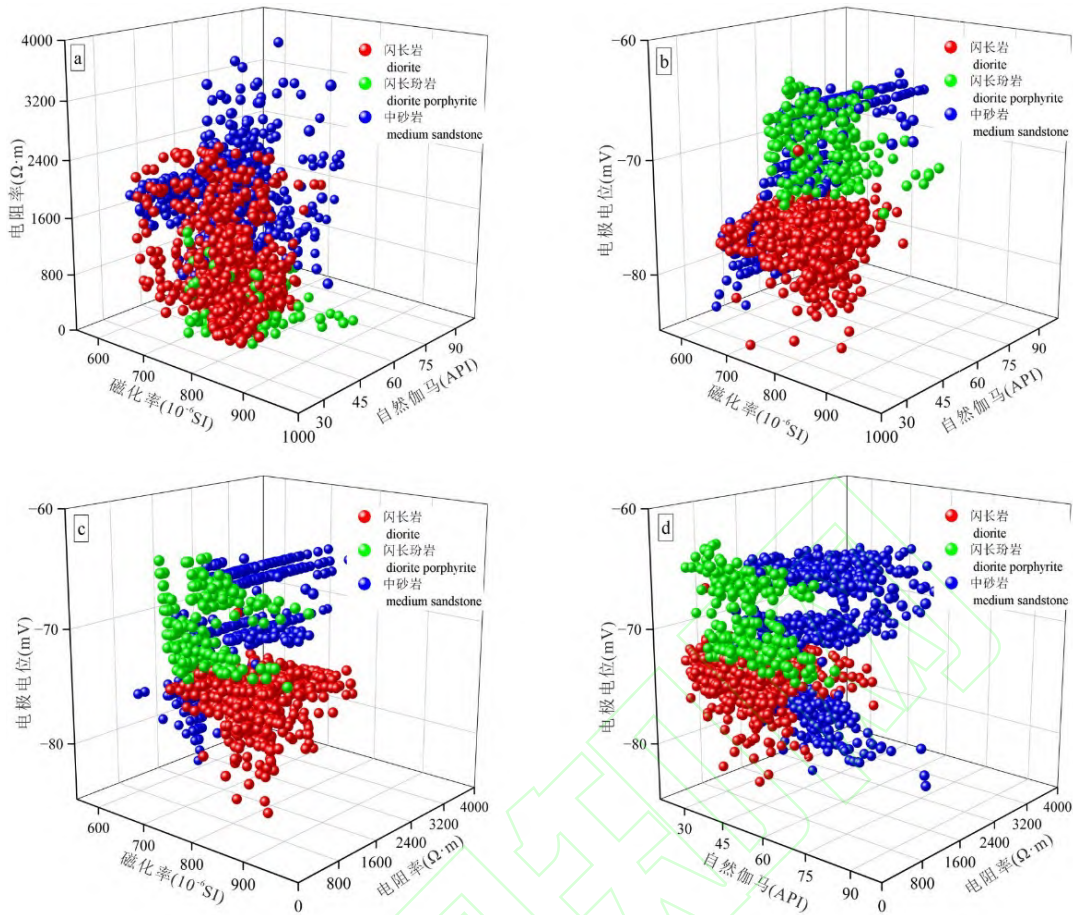
a—histograms of physical properties of medium sandstone; b—histograms of physical properties of diorite;

c—histograms of physical properties of diorite porphyrite.

图 3 ZK0706 孔主要岩性的物性统计直方图

Fig. 3 Physical property statistic histograms of the main lithology in hole ZK0706





a—磁化率、自然伽马、电阻率交会图; b—磁化率、自然伽马、电极电位交会图;  
c—磁化率、电阻率、电极电位交会图; d—自然伽马、电阻率、电极电位交会图。

a—intersection plot of magnetic susceptibility, gamma and resistivity; b—intersection plot of magnetic susceptibility, gamma and electrode potential; c—intersection plot of magnetic susceptibility, resistivity and electrode potential; d—intersection plot of gamma, resistivity and electrode potential.

图 4 ZK0706 孔岩性识别交会图

Fig. 4 Intersection diagram of lithology identification of hole ZK0706

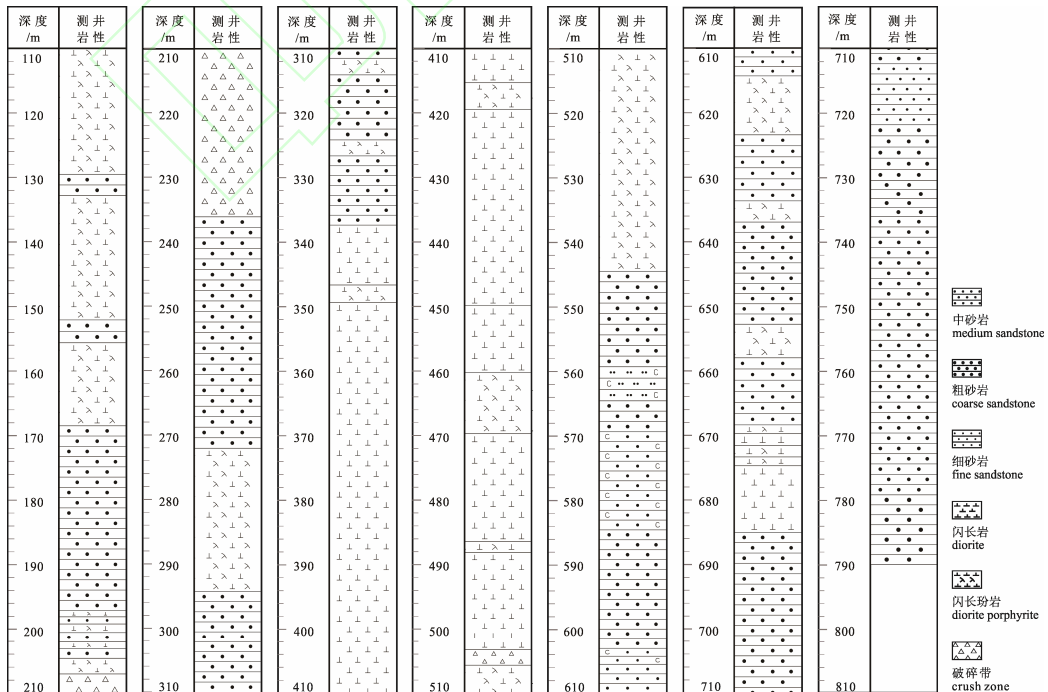


图 5 ZK0706 孔测井划分岩性剖面图

Fig. 5 Lithology profile divided with logging data of hole ZK0706

2.2 矿化蚀变的测井响应特征与识别

宝兴沟金矿床围岩蚀变以黄铁矿化(伴毒砂化)、方铅矿化、硅化、碳酸盐化及绿泥石化为特征,金矿化多呈星点状、浸染状及细脉-网脉状赋存于蚀变岩中,矿石金属硫化物(毒砂、黄铁矿)平均含量2.97%(李向文, 2015; 宋丙剑等, 2015)。研究表明:硅化作用通常会提升岩石电阻率,但硅化也易形成构造破碎(如裂隙发育或硅化破碎带形成)会显著降低电阻率并增加孔隙度(周远田, 1990; 薛融晖等, 2011; 岳连雄等, 2013);黄铁矿化(含量>5%)与方铅矿化均会导致电阻率降低,当矿化程度增强形成致密块状矿体时,可诱发显著自然电位异常,其中黄铁矿作为弱磁性矿物,其富集可产生弱磁异常,而方铅矿则不会引起弱磁异常(张参辉等, 2018; 沈立军等, 2021; 刘东明等, 2024; Wang et al., 2024);金矿物或电子导电物质与刷子电极接触时,可引发电极电位曲线突发性跃变(曾明月, 1976; Ottewill et al., 1992)。据此建立蚀变识别标志:硅化对应高电阻率异常或电阻率-声波速度双低异常;黄铁矿化表现为磁化率高值异常;金矿化则显示电极电位高值异常。

基于上述矿化蚀变的测井识别标志,对ZK0706孔110~790 m井段进行了矿化蚀变带的识别与划分,并给出了典型矿化蚀变井段的测井曲线特征(图6)和响应特征值(表2)。闪长岩、闪长玢岩、中砂岩黄铁矿化井段均无明显的磁化率高异常(图6a-c),部分井段具有明显的磁三分量异常(图6c),三个井段均具有明显的电阻率低阻异常和电极电位突变异常,表明这些矿化井段黄铁矿含量较低,岩石相对破碎,电子导电矿物赋存。

综合ZK0706孔测井综合柱状图(图7)与表1-2解析表明:电阻率与声波时差呈显著负相关性,表现为声波时差增大伴随电阻率降低,且蚀变强度与电阻率降幅呈正相关关系;电极电位曲线异常幅值随硅化及金属矿化强度增强而增大;围岩蚀变作用可诱发闪长玢岩自然伽马升高。综合分析揭示:该孔黄铁矿化段硫化物含量较低,单纯黄铁矿化难以导致地层电阻率显著降低,而硅化作用诱发的岩体破碎结构实为电阻率下降的主控因素。

3 讨论

金是一种微量元素,自然界中含量较低,其本身并无明显的地球物理响应(自然金除外),一般需要依赖伴生矿物或围岩蚀变进行间接推断。基于ZK0706钻孔测井数据解译成果,结合岩心编录、样品测试分析及地质信息综合研究,本文构建了利用地球物理测井参数识别金矿化有利层段的找矿标志。

3.1 低阻中高自然伽马指示金矿有利层位

地质研究表明,宝兴沟金矿床矿体就位受控于北东向侵入岩展布,其产状与闪长岩、闪长玢岩具一致性,主要赋存于二十二站组蚀变中砂岩与蚀变闪长玢岩接触带,成矿结构面类型为“岩性界面+层间构造蚀变破碎带”。岩性测井响应特征显示(表1-2):ZK0706孔蚀变闪长玢岩呈现高自然伽马值,蚀变中砂岩及中砂岩为中高值,其余岩性均为低值;闪长玢岩与砂岩经矿化蚀变后电阻率显著降低,其值低于其他岩性,低电阻率-中高自然伽马组合带可有效指示蚀变闪长玢岩带或岩性过渡带,间接指示了找金有利层位。图7揭示全孔可划分3个低阻-

表 2 典型矿化蚀变带及其物性统计表  
Table 2 Statistical table of typical mineralized alteration zones and their physical properties

岩性	测点位置/m	矿化蚀变类型	磁化率 /(10 <sup>-6</sup> SI)	自然伽马 /API	声波时差 /(μs/m)	电阻率 /(Ω·m)	电极电位 /mV
中砂岩	316.48	硅化/黄铁矿化/方铅矿化	702.15	91.71	50.96	110.30	-7.00
	317.43	硅化/黄铁矿化/方铅矿化	701.50	72.90	47.92	94.40	-17.00
	318.38	硅化/黄铁矿化/方铅矿化	701.50	95.46	52.19	105.00	-27.00
	334.60	黄铁矿化	694.72	68.46	83.68	428.30	-70.00
	548.87	硅化/方铅矿化/黄铁矿化	645.10	51.20	52.19	126.20	-21.00
闪长玢岩	512.84	黄铁矿化/方铅矿化	648.99	55.98	62.74	110.30	-73.00
	513.80	黄铁矿化/方铅矿化	649.00	69.48	81.58	221.60	-45.00
	514.80	黄铁矿化/方铅矿化	649.98	73.14	46.61	158.00	-70.00
	521.52	黄铁矿化	649.00	81.59	76.81	444.20	-51.00
	674.03	黄铁矿化/方铅矿化	617.50	104.38	-	1 138.50	-77.00
闪长岩	669.76	黄铁矿化	616.88	130.05	-	635.00	-78.00
	338.40	黄铁矿化	803.16	47.56	45.33	1 249.80	-72.00



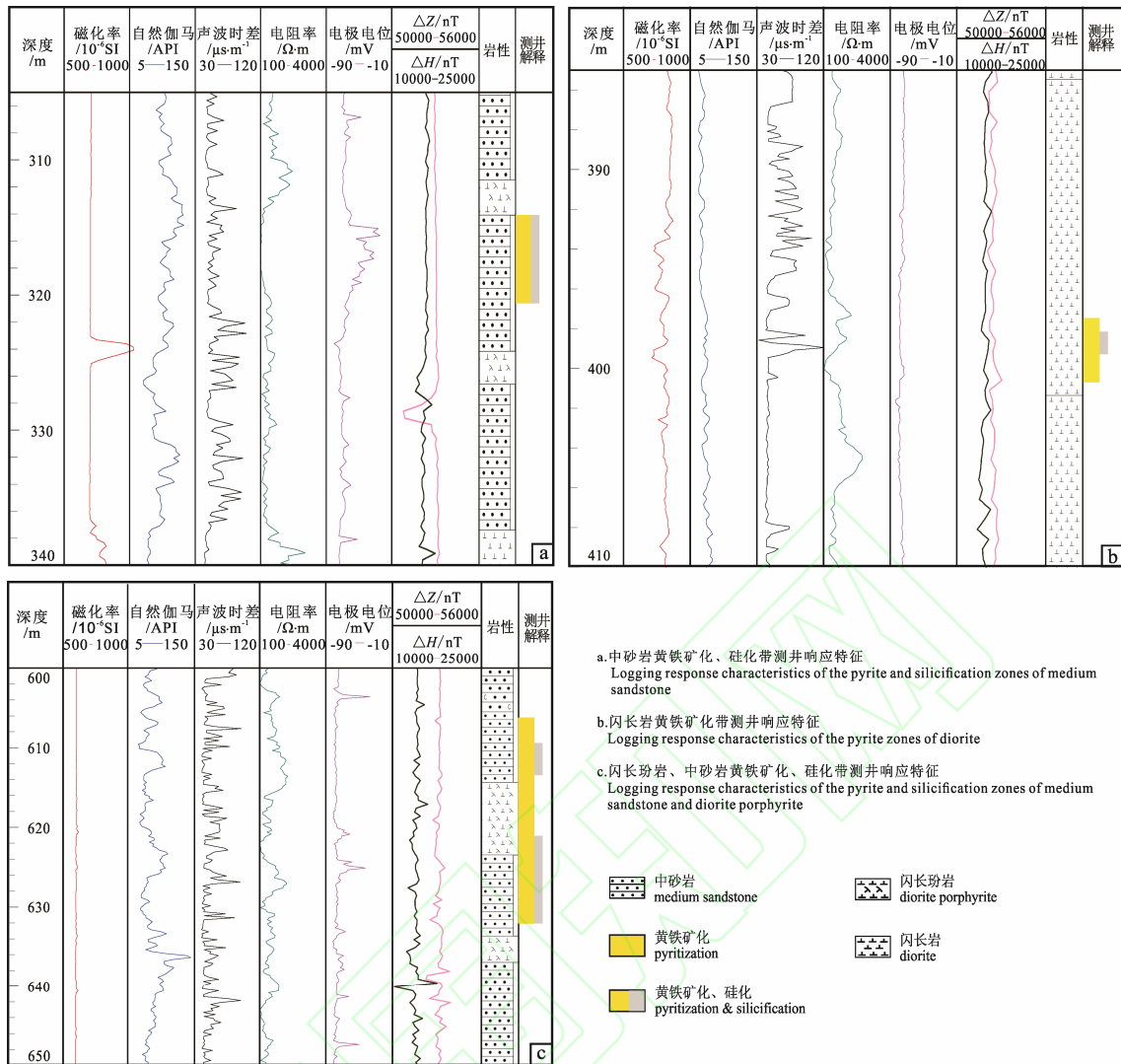


图6 ZK070孔典型矿化蚀变带测井响应特征

Fig.6 Logging response characteristics of typical mineralized alteration zones in hole ZK0706

自然伽马异常层: ①层低阻高自然伽马带对应厚层蚀变中砂岩与薄层闪长玢岩互层带; ②层低阻+自然伽马中-高过渡带, 上部低阻中自然伽马段表征蚀变闪长玢岩-中砂岩接触带, 下部低阻高自然伽马段反映蚀变砂岩过渡带; ③层低阻中自然伽马带指示蚀变中砂岩带。岩心测试数据(表3)显示: ①层对应I-2号矿体, ②、③层共同控制I-1号矿体, 验证低阻中高自然伽马组合带可精准定位钻孔揭露的2条金矿体。通过电阻率-自然伽马曲线联合解译, 识别岩性蚀变带, 可有效预测矿体赋存空间。低阻中高自然伽马曲线的特征可以作为宝兴沟金矿床的测井找矿标志。

### 3.2 电极电位多峰高值异常指示找金有利层位

宝兴沟金矿床金矿体矿化类型主要为硅化-黄铁矿化闪长玢岩型和蚀变砂岩型。ZK0706孔岩心样品测试分析确定的金矿体均位于测井识别的尖脉冲状电极电位异常井段内(图7), 因此, 电极电位高值异常直接指示了金矿体的有利赋存位置。ZK0706

孔识别出的电极电位异常段分别位于A、B、C三个异常带内, 其中A带圈定了I-2号矿体, B、C、D、E带圈定了I-1号矿体, 电极电位异常带成功圈定了ZK0706孔钻遇的2条金矿体。因此, 在宝兴沟金矿床钻孔找矿中, 利用电极电位脉冲状多峰高值异常的响应特征识别金属矿化层位, 可直接指示矿体的有利赋存位置。电极电位多峰高值特征可以作为宝兴沟金矿床的测井找矿标志。

将两类测井找矿标志圈定的找金有利层位叠合起来, 可以看到①层与A带, ②层与B、C、D带, ③层与E带相重合, 各层岩心样品测试分析均见工业矿体。结合地质资料认为, 测井圈定的①层应为I-2号含矿构造蚀变破碎带; ②、③层为I-1号含矿构造蚀变破碎带。因此, 多参数综合测井方法能够准确地圈定出找金的有利层位。

当前宝兴沟金矿区深部及外围勘探仍以高精度地面物化探方法配合全孔取心技术为主, 其中地面物化探技术用于圈定深部异常靶区, 全孔取心技

术则实现矿体精准定位(张富程等, 2015)。与常规勘探手段相比, 地球物理测井具有双重优势: 一方面具备更高的探测精度, 受地表电磁干扰及地形限制较小; 另一方面勘探成本较全孔取心作业显著降低。通过系统实施地球物理测井, 构建岩石物性参数与地层岩性、矿化蚀变特征的定量关联模型(构建

深部物探解译标尺), 可显著提升地面物探数据的解译置信度。此外, 基于测井响应建立的找矿标志体系不仅能指导钻孔优化设计, 还能通过解释模型迭代更新使测井-岩心吻合率大幅提升, 逐步替代部分乃至全部取心流程, 最终达成勘探成本压缩与找矿效益倍增的双重目标(刘东明等, 2024)。

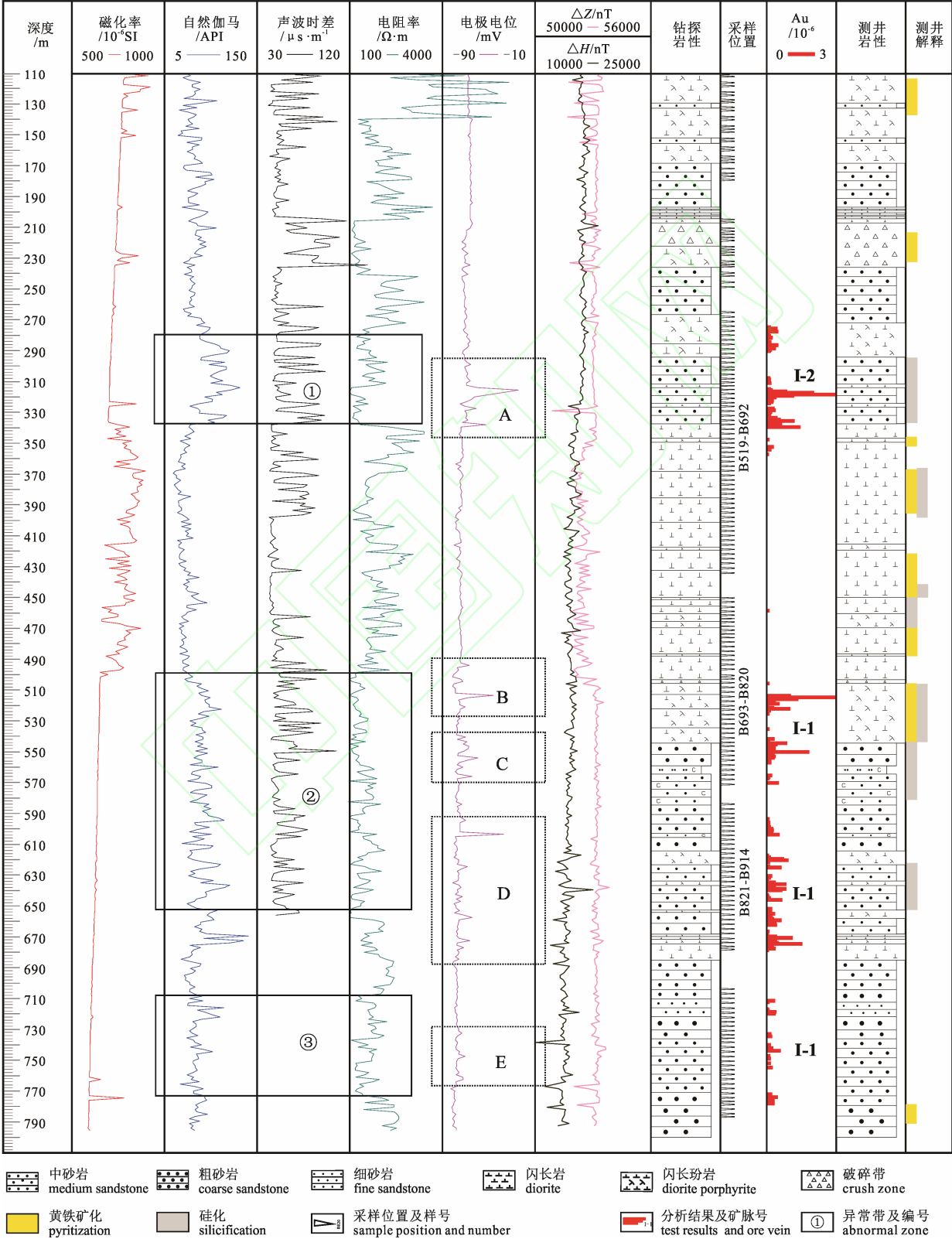


图 7 综合测井划分金矿有利层位图  
Fig. 7 Favorable horizons for gold prospecting defined with logging data

表 3 ZK0706 孔岩心样品及测试结果  
Table 3 Location and test results of the ZK0706 core samples

样品号	采样位置/m		厚度 /m	Au /10 <sup>-6</sup>	矿脉号	样品号	采样位置/m		厚度 /m	Au /10 <sup>-6</sup>	矿脉号
	顶深	底深					顶深	底深			
B528-531	273.61	277.64	4.03			B789-797	540.62	548.87	8.25		
B533-535	278.60	281.50	2.90			B798	548.87	550.01	1.14	1.84	I-1
B537-544	282.50	290.40	7.90			B799-805	550.01	556.95	6.94		
B562-563	306.80	308.50	1.70			B813-815	564.55	567.50	2.95		
B566	310.10	310.94	0.84			B818	569.37	570.10	0.73		
B571-573	314.09	316.48	2.39			B830	592.50	593.46	0.96		
B574-576	316.48	319.38	2.90	2.74	I-2	B833-839	594.96	602.00	7.04		
B578-581	319.38	324.15	4.77			B841	603.04	603.90	0.86		
B585-592	326.60	334.60	8.00			B855-859	616.43	621.43	5.00		
B593	334.60	335.60	1.00	1.19	I-2	B862-863	623.43	625.20	1.77		
B594-596	335.60	338.40	2.80			B868-899	629.41	662.40	32.99		
B597	338.40	346.60	8.20	1.46	I-2	B903-906	665.40	669.76	4.36		
B605	346.60	347.50	0.90			B907	669.76	670.71	0.95	1.11	I-1
B610	351.34	352.34	1.00			B908	670.71	671.61	0.90		
B612	353.34	354.34	1.00			B911	673.32	674.03	0.71		
B701	457.56	458.46	0.90			B912	674.03	674.74	0.71	1.55	I-1
B753	504.85	505.65	0.80			B914-916	675.74	678.74	3.00		
B761-763	512.84	515.80	2.96	1.83	I-1	B922-923	710.34	712.40	2.06		
B764-769	515.80	521.25	5.45			B927-930	715.64	719.88	4.24		
B770	521.52	522.32	0.80	1.03	I-1	B952-954	738.90	742.00	3.10		
B771-773	522.32	525.40	3.08			B956-967	742.87	754.80	11.93		
B783	534.48	535.50	1.02			B984-991	770.97	778.20	7.23		

注: Au 小于 0.1×10<sup>-6</sup> 未单独列出。

4 结论

本文对宝兴沟金矿床 ZK0706 孔 110~790 m 井段地球物理测井资料进行研究, 分析了该孔地层岩性、矿化蚀变的响应特征, 提出了地球物理测井找金的找矿标志, 取得了以下主要认识:

(1)ZK0706 孔主要岩性测井结果显示, 自然伽马、电阻率、磁化率及电极电位四参数组合可有效鉴别中砂岩、闪长岩、闪长玢岩。地球物理综合测井参数可以作为重建金矿钻孔岩性剖面的主要依据。

(2)宝兴沟矿区 ZK0706 孔黄铁矿化层位黄铁矿含量低(<5%), 不足以引起地层电阻率的明显降低, 硅化和岩石碎裂是引起电阻率降低的主要因素。

(3)低阻中高自然伽马和电极电位多峰高值异常的测井响应特征均指示了含矿有利层, 该组合特征可以作为宝兴沟金矿区地球物理测井找金的找矿标志。

(4)基于测井数据构建深部找矿物探解释标尺体系, 指导钻孔定位预测, 可显著提升地面物探数据解译可靠性, 同时优化勘探成本。

参考文献:

黑龙江省地质矿产局, 1988. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.

程晓飞, 公维国, 陈满, 等, 2011. 黑龙江省塔河县宝兴沟金矿床成因探讨[J]. 现代矿业, 27(10): 37-39.

陈新凯, 周振华, 2023. 大兴安岭锂-铍-铌-钽等关键金属矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. 岩石学报, 39(7): 1973-1991.

陈卓, 李向文, 李师白, 等, 2018. 黑龙江宝兴沟金矿床构造叠加晕特征及深部预测[J]. 地质与勘探, 54(3): 535-543.

底青云, 薛国强, 雷达, 等, 2021. 华北克拉通金矿综合地球物理探测研究进展——以辽东地区为例[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1524-1535.

李向文, 杨言辰, 王献忠, 等, 2012. 黑龙江省塔河县宝兴沟金矿床地质特征及成矿构造环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1700-1710.

李向文, 2015. 上黑龙江成矿带金矿床成矿规律与找矿预测研究[D]. 长春: 吉林大学.

李向文, 张志国, 王可勇, 等, 2018. 大兴安岭北段宝兴沟金矿



床成矿流体特征及矿床成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(4): 1071-1084.

刘东明, 梁明星, 冯杰, 等, 2024. 辽东小佟家堡子金矿床地球物理测井响应特征及找矿标志[J]. 地球科学, 49(3): 1066-1080.

刘建明, 张锐, 张庆洲, 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地学前缘, 11(1): 269-277.

吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等, 2019. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 62(10): 3629-3664.

慕倩, 韩江涛, 刘立家, 等, 2023. 切穿兴蒙造山带的深断面——岩石圈电性结构及改造模式[J]. 地球物理学报, 66(4): 1603-1617.

沈立军, 朱裕振, 李双, 等, 2021. 地球物理测井在金属矿深部找矿中的应用[J]. 测井技术, 45(4): 431-438.

宋丙剑, 王晓勇, 马靖, 2015. 大兴安岭北部金矿床地质特征、成因及构造背景[J]. 矿物岩石, 35(2): 15-24.

URBANCIC T I, BAILEY R C, 郭武林, 1989. 金矿勘探中地球物理测井资料的统计技术应用[J]. 国外铀金地质, 6(3): 48-58.

汪青松, 张金会, 尤森, 等, 2021. 井中矿层多要素探测方法研究与厚覆盖区金矿勘查试验——以皖东北五河地区为例[J]. 地质与勘探, 57(1): 136-145.

王新娥, 许东晖, 孙之夫, 等, 2014. 山东黄金资源钻探井测井资料分析方法与应用[J]. 地球科学进展, 29(3): 397-403.

王献忠, 宋贵斌, 公维国, 等, 2014. 黑龙江塔河宝兴沟金矿床地质特征及流体包裹体研究[J]. 黄金, 35(4): 19-25.

武广, 2006. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用[D]. 长春: 吉林大学.

武广, 张彤, 王忠, 等, 2024. 大兴安岭成矿省成矿单元划分与金属矿床成矿系列[J]. 西部资源, (6): 1-16, 147.

武军杰, 智庆全, 邓晓红, 等, 2020. 辽东白云金矿区深部地质结构的瞬变电磁法探测[J]. 地球科学, 45(11): 4027-4037.

王志辉, 吕庆田, 严加永, 2016. 金矿地球物理勘查方法综述[J]. 地球物理学进展, 31(2): 805-813.

熊玉新, 于学峰, 迟乃杰, 等, 2018. 焦家金矿带 3000m 科研深钻地球物理测井及初步分析[J]. 山东国土资源, 34(5): 66-73.

薛融晖, 王光杰, 底青云, 等, 2011. 广东韶关某地找矿的多种地球物理方法综合应用[J]. 地球物理学进展, 26(4): 1364-1371.

岳连雄, 杨高学, 王彦明, 等, 2013. 甘肃寨上金矿综合信息找矿模型研究[J]. 黄金科学技术, 21(3): 43-47.

张参辉, 郭玉溪, 白德胜, 等, 2018. 河南嵩县槐树坪金矿矿体富集规律与电性特征的关系[J]. 现代矿业, 34(4): 46-51.

张富程, 杨言辰, 李向文, 等, 2015. 十五里桥金矿区物化探异常特征及应用[J]. 物探与化探, 39(2): 262-267.

张顺, 林春明, 吴朝东, 等, 2003. 黑龙江漠河盆地构造特征与成盆演化[J]. 高校地质学报, 9(3): 411-419.

赵广江, 侯玉树, 杨继权, 2006. 黑龙江二十一站金、铜矿床地质特征及成矿模式[J]. 西北地质, 39(4): 33-39.

赵丕忠, 谢学锦, 程志中, 2014. 大兴安岭成矿带北段区域地球化学背景与成矿带划分[J]. 地质学报, 88(1): 99-108.

周传芳, 公维国, 宋丙剑, 等, 2012. 黑龙江省宝兴沟金矿成矿地质条件及成因探讨[J]. 地质与资源, 21(3): 271-276, 284.

周传芳, 王献忠, 李向文, 等, 2018. 黑龙江省塔河县宝兴沟金矿床中生代侵入岩及其对成矿作用的制约[J]. 矿床地质, 37(1): 137-150.

周平, 陈胜礼, 朱丽丽, 2009. 几种金属矿地下物探方法评述[J]. 地质通报, 28(2-3): 224-231.

周远田, 1990. 金矿测井[J]. 地质科技情报, 9(4): 59-63.

曾明月, 1976. 电极电位测井曲线解释中的几个问题[J]. 煤田地

质与勘探, 4(4): 55-56, 43.

## References:

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province, 1988. Regional Geology of Heilongjiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHENG Xiaofei, GONG Weiguo, CHEN Man, et al., 2011. Discussion on genesis of baoxinggou gold deposit in Tahe County, Heilongjiang Province[J]. Modern Mining, 27(10): 37-39(in Chinese).
- CHEN Xinkai, ZHOU Zhenhua, 2023. Deposit types, metallogenesis and resource prospect of Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(7): 1973-1991(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zhuo, LI Xiangwen, LI Shibai, et al., 2018. Characteristics of superimposed structural haloes and deep-seated ore prediction in the Baoxinggou gold deposit of Heilongjiang Province[J]. Geology and Exploration, 54(3): 535-543(in Chinese with English abstract).
- DI Qingyun, XUE Guoqiang, LEI Da, et al., 2021. Summary of technology for a comprehensive geophysical exploration of gold mine in North China Craton[J]. Science Sinica Terrae, 51(9): 1524-1535(in Chinese with English abstract).
- IRVINE R J, SMITH M J, 1990. Geophysical exploration for epithermal gold deposits[J]. Journal of Geochemical Exploration, 36(1-3): 375-412.
- LI Xiangwen, YANG Yanchen, WANG Xianzhong, et al., 2012. Geologic characteristics and metallogenic tectonic environment of the Baoxinggou gold deposit in Tahe, Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 42(6): 1700-1710(in Chinese with English abstract).
- LI Xiangwen, 2015. Metallogenic regularities of gold deposits in upper Heilongjiang metallogenic belt and its prospecting[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- LI Xiangwen, ZHANG Zhiguo, WANG Keyong, et al., 2018. Characteristics of Ore-Forming Fluid and Genesis of Baoxinggou Gold Deposit in North of Great Xing'an Range[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 48(4): 1071-1084(in Chinese with English abstract).
- LIU Dongming, LIANG Mingxing, FENG Jie, et al., 2024. Response Characteristics and its Prospecting Signs of Geophysical well Logging in Xiaotongjiabuzi Gold Deposit, Eastern Liaoning Province[J]. Earth Science, 49(3): 1066-1080(in Chinese with English abstract).
- LIU Jianming, ZHANG Rui, ZHANG Qingzhou, 2004. The Regional Metallogeny of Da Hinggan Ling, China[J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 269-277(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qingtian, ZHANG Xiaopei, TANG Jingtian, et al., 2019. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(10): 3629-3664(in Chinese with English abstract).
- LU Yurun, LIU Cai, LI Qinglu, et al., 2015. Application of geophysical-geochemical method in verification of stream sediment anomaly in Baoxinggou area of Heilongjiang[J]. Global Geology, 18(1): 67-74.

- MU Qian, HAN Jiangtao, LIU Lijia, et al., 2023. The deep section cutting through the Xing'an Mongolia Orogenic Belt: Lithospheric resistivity structure and modification model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(4): 1603-1617(in Chinese with English abstract).
- Ottewill G A, WALSH F C, 1992. Electrode Potential Measurements[J]. Transactions of the IMF, 70(3): 141-143.
- SHEN Lijun, ZHU Yuzhen, LI Shuang, et al., 2021. Application of Geophysical Logging in Deep Metallic Ore Prospecting[J]. Well Logging Technology, 45(4): 431-438(in Chinese with English abstract).
- SONG Bingjian, WANG Xiaoyong, MA Jing, 2015. Characteristics of geological, genesis and structural background of gold deposits in the north Daxing'anling, Northeast China[J]. Journal of Mineralogy Petrology, 35(2): 15-24(in Chinese with English abstract).
- URBANCIC T I, BAILEY R C, GUO Wulin, 1989. The application of statistical techniques for Geophysical logging data in Gold exploration[J]. Uranium and gold geology abroad, 6(3): 48-58(in Chinese).
- WANG Mengqi, SUN Tong, HONG Meiling, et al., 2024. The Electrical Properties of Dacite Mixed with Various Pyrite Contents and Its Geophysical Applications for the High-Conductivity Duobaoshan Island Arc[J]. Minerals, 14(10): 1032.
- WANG Qingsong, ZHANG Jinhui, YOU Miao, et al., 2021. Study on the multiple-element exploration method of ore beds in wells and gold exploration experiment in the area with thick cover—Taken Wuhe area in Northeast Anhui as an example[J]. Geology and Exploration, 57(1): 136-145(in Chinese with English abstract).
- WANG Ruiliang, ZENG Qingdong, ZHANG Zhaochong, et al., 2021. Extensive mineralization in the eastern segment of the Xingmeng orogenic belt, NE China: A regional view[J]. Ore Geology Reviews, 135: 104204.
- WANG Xine, XU Donghui, SUN Zhifu, et al., 2014. Wireline logs analysis and application of Shandong gold resources scientific drilling[J]. Advances in Earth Science, 29(3): 397-403(in Chinese with English abstract).
- WANG Xianzhong, SONG Guibin, GONG Weiguo, et al., 2014. Study on geological characteristics and fluid inclusions of Baoxinggou Gold Deposit in Tahe, Heilongjiang Province[J]. Gold, 35(4): 19-25(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhihui, LÜ Qingtian, YAN Jiayong, 2016. Review of Geophysics for Gold Deposit[J]. Progress in Geophysics, 31(2): 805-813(in Chinese with English abstract).
- WU Guang, 2006. Metallogenic Setting and Metallogenesis of Nonferrousprecious Metals in Northern Da Hinggan Mountain[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- WU Guang, ZHANG Tong, WANG Zhong, et al., 2024. The division of metallogenic units in the mineralization provinces of the Daxinganling and the metallogenic series of metal deposits[J]. Western Resources, (6): 1-16, 147(in Chinese).
- WU Junjie, ZHI Qingquan, DENG Xiaohong, et al., 2020. Exploration of Deep Geological Structure of Baiyun Gold Deposit in Eastern Liaoning Province with TEM[J]. Earth Science, 45(11): 4027-4037(in Chinese with English abstract).
- XIONG Yuxin, YU Xuefeng, CHI Naijie, et al., 2018. Geophysical logging and Primary Analysis of Scientific Research Deep Drilling at the Depth of 3000m in Jiaojia Gold Belt[J]. Shandong Land and Resources, 34(5): 66-73(in Chinese with English abstract).
- XUE Ronghui, WANG Guangjie, DI Qingyun, et al., 2011. The comprehensive application of several geophysical methods in mineral exploration in Guangdong, Shaoguan[J]. Progress in Geophysics, 26(4): 1364-1371(in Chinese with English abstract).
- YUE Lianxiong, YANG Gaoxue, WANG Yanming, et al., 2013. Comprehensive Information Prospecting Model of the Zhaishang Gold Deposit in Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 21(3): 43-47(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Canhui, GUO Yuxi, BAI Desheng, et al., 2018. Relationship between the Enrichment Regularity and Electrical Characteristics of Huaishuping Gold Deposit in Song County, Henan Province[J]. Modern Mining, 34(4): 46-51(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Fucheng, YANG Yanchen, LI Xiangwen, et al., 2015. The effect of applying geophysical and geochemical anomalies to the Shiwuliqiao gold deposit in Heilongjiang Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 39(2): 262-267(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shun, LIN Chunming, WU Chaodong, et al., 2003. Tectonic Characteristics and Basin Evolution of the Mohe Basin, Heilongjiang Province[J]. Geological Journal of China Universities, 9(3): 411-419(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Guangjiang, HOU Yushu, YANG Jiquan, 2006. Geological Characteristics and Metallogenic Model of Ershiyizhan Gold and Copper Deposits in Heilongjiang Province[J]. Northwestern Geology, 39(4): 33-39(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Pizhong, XIE Xuejin, CHENG Zhizhong, 2014. Regional Geochemical Background and Metallogenic Belt Division of North Da Hinggan Mountain[J]. Acta Geologica Sinica, 88(1): 99-108(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Chuanfang, GONG Weiguo, SONG Bingjian, et al., 2012. Geology and metallogenesis of the Baoxinggou gold deposit in Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 21(3): 271-276, 284(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Chuanfang, WANG Xianzhong, LI Xiangwen, et al., 2018. Mesozoic intrusive rocks and their constraints on mineralization in Baoxinggou gold deposit in Tahe County, Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 37(1): 137-150(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Ping, CHEN Shengli, ZHU Lili, 2009. Review of a number of subsurface geophysical prospecting methods used for metallic deposits[J]. Geological Bulletin of China, 28(2-3): 224-231(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yuantian, 1990. Gold Logging[J]. Geological Science and Technology Information, 9(4): 59-63(in Chinese with English abstract).
- ZENG Mingyue, 1976. Several issues in the interpretation of electrode potential logging curves[J]. Coal Geology and Exploration, 4(4): 55-56, 43(in Chinese).